

## АЛГОРИТМ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ НА ОСНОВЕ WAVELET-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

### 1. Введение

Внедрение цифровых водяных знаков (Digital Watermarking) в последнее время получает все большее распространение [1, 2, 3]. Это связано в основном с борьбой за защиту авторских прав на мультимедиа-продукцию, которая, будучи размещенной в Интернете, становится чрезвычайно уязвимой для нелегального тиражирования. Конечно, сфера применения цифровых водяных знаков этим не ограничивается. Например, цифровые водяные знаки могут использоваться для передачи секретной информации, проверки подлинности электронных документов и в ряде других приложений.

Что же представляет собой Digital Watermarking? В любом случае это прежде всего добавление к исходной информации (цифровому изображению, видео- или звуковому файлу) некоторой дополнительной информации. Способ добавления и требования, предъявляемые к полученному измененному файлу, зависят от назначения водяного знака и могут быть диаметрально противоположны для разных видов водяных знаков. Поэтому имеет смысл привести краткую классификацию основных их разновидностей.

#### *1.1. Разновидности водяных знаков*

##### *1.1.1. Водяные знаки для защиты авторских прав*

Краткая формулировка задачи следующая. Владелец мультимедиа-продукта защищает водяным знаком копию и предоставляет потенциальным покупателям свободный доступ к ней. Водяной знак наносится в этом случае для того, чтобы, обнаружив незаконно используемый образец продукта, владелец мог доказать, что это тот самый образец, который был предоставлен для демонстрации с соответствующими ограничениями на использование, а не законно приобретенная копия. Схема доказательства ясна: если в копии обнаруживается знак, внесенный владельцем, значит, копия нелегальная.

Для успешного применения такой водяной знак должен удовлетворять двум важным требованиям. Во-первых, он не должен сильно влиять на визуальное (аудиальное) восприятие мультимедиа-информации, т. е. должен быть незаметным. Во-вторых, водяной знак может подвергаться так называемым *атакам* — операциям над мультимедиа-продуктом, которые способны, не сильно влияя на качество восприятия мультимедиа-продукта, «стереть» водяной знак или сделать его нечитаемым. Атаки могут быть как умышленными, так и неумышленными и состоять, например, в сжатии с потерей качества (для изображений это, как правило, сжатие JPEG, для звуковых файлов — сжатие MPEG) или в вырезании фрагмента файла. Таким образом, возникает такое важное требование к водяному знаку, как его устойчивость. Это, пожалуй, наиболее сильное из всех требований, предъявляемых к водяным знакам, используемым для защиты авторских прав.

Нетрудно понять, что эти два требования противоречат друг другу. Поэтому, разрабатывая и внедряя водяные знаки, приходится искать разумный компромисс между устойчивостью и незаметностью.

#### *1.1.2. Водяные знаки для проверки подлинности документа*

Краткая формулировка задачи состоит в следующем. Отправитель, пересылая некоторый электронный документ Получателю, внедряет в него водяной знак. Получив документ и обнаружив в нем знак, Получатель понимает, что этот документ не был изменен по пути и не является подделкой. Если же знак не найден, значит, документ изменен или подменен.

Требования к такому водяному знаку достаточно очевидны: это опять же незаметность и, на сей раз, неустойчивость: при малейшем искажении документа водяной знак должен стираться.

#### *1.1.3. Водяные знаки для передачи секретной информации*

Постановка задачи следующая. Требуется вместе с безобидным на вид мультимедиа-файлом передать некоторую дополнительную, в общем случае не безобидную, информацию. Требования, предъявляемые к этому способу, сходны с требованиями, предъявляемыми к водяным знакам для защиты авторских прав. Правда, к ним добавляется еще одно — достаточная емкость, или максимальный размер дополнительной информации.

Пожалуй, наиболее любопытным (из-за заложенного изначально противоречия в требованиях) является применение цифровых водяных знаков для защиты авторских прав. Именно эта сфера применения и рассмотрена в данной работе. Поэтому далее под водяными знаками будет пониматься именно эта их разновидность, а в качестве носителя водяных знаков будет рассматриваться статическое цифровое изображение.

### 1.2. Способы обнаружения и внедрения водяных знаков

По способу обнаружения водяных знаков их можно разделить на две категории:

- водяные знаки, для обнаружения которых требуется исходное изображение (оригинал);
- водяные знаки, для обнаружения которых оригинала не требуется (так называемый blind watermarking).

В первом случае водяной знак обнаруживается в процессе сравнения изображения с оригиналом, тогда как во втором случае задача усложняется, поскольку сравнивать изображение не с чем.

Существуют знаки, для считывания которых не требуется никакой дополнительной информации, т. е. любой желающий может считать водяной знак, имея изображение и программу для считывания. Например, графический пакет Adobe Photoshop позволяет внедрять и считывать именно такие знаки. Другая разновидность знаков — знаки, для обнаружения которых необходимо знать водяной знак. Вообще говоря, говорить о считывании подобных водяных знаков некорректно — правильнее говорить о проверке, помечено ли исследуемое изображение данным знаком. Хотя такие водяные знаки абсолютно бесполезны с точки зрения передачи секретной информации, они могут успешно использоваться для защиты авторских прав и для проверки подлинности информации.

По способу внедрения водяных знаков можно также выделить две основные категории:

- водяные знаки, внедряемые в амплитудный диапазон;
- водяные знаки, внедряемые в частотный диапазон.

В первом случае изменение изображения производится путем непосредственного изменения значений яркостей пикселей изображения, во втором — изображение сначала подвергается некоторому преобразованию, например дискретному преобразованию Фурье (DCT), после чего изменения вносятся в коэффициенты базисных функций, т. е. в частотный диапазон.

Второй подход удобен тем, что позволяет получать водяные знаки, обладающие хорошей устойчивостью по отношению к определенному алгоритму сжатия с потерей качества, ведь в его основе лежит тот же аппарат приближения функций, который используется для сжатия изображения. Например, разрабатывая водяной знак, который должен быть устойчивым по отношению к сжатию JPEG, имеет смысл поступить так же, как и JPEG, т. е. разбить изображение на квадраты, провести в каждом дискретное преобразование Фурье, и работать с полученными коэффициентами [4, 5].

В последнее время все большую популярность получает сжатие информации с помощью wavelet-преобразования, которое лежит в основе нового разрабатываемого формата JPEG2000. Поэтому не удивительно, что появляются алгоритмы внедрения водяных знаков, основанные на wavelet-преобразовании [6, 7]. Разработке одного из таких алгоритмов посвящена и данная работа.

## 2. Описание работы алгоритма

Результатом работы является алгоритм внедрения водяных знаков, использующий wavelet-преобразование. Для обнаружения знака необходимо знание самого водяного знака, но оригинал изображения не требуется (см. классификацию водяных знаков в 1.1).

Знаки устойчивы по отношению к сжатию JPEG и некоторым другим искажениям изображения.

### 2.1. Краткая схема работы алгоритма

Сначала с помощью wavelet-преобразования, которое будет описано в п. 2.2 ниже, переходим к массивам коэффициентов, соответствующих различным слоям резкости изображения. Далее выбирается слой изображения (подмножество коэффициентов wavelet-преобразования) и в него вносятся изменения (2.3), которые могут быть выявлены на стадии обнаружения водяного знака (2.4). При выборе слоя следует учитывать два основных фактора.

- Чем меньшей резкости изображения соответствует слой, тем больше существенной для восприятия информации он несет. Поэтому такой слой более устойчив по отношению к искажениям изображения и знаки, внедряемые в него, будут более устойчивыми.
- С другой стороны, чем меньшей резкости изображения соответствует слой, тем меньше в нем коэффициентов. Соответственно уменьшается число хорошо различимых между собой водяных знаков и увеличивается вероятность ложной тревоги — обнаружения знака в непомеченном изображении.

Правильно выбрав диапазон и интенсивность внедрения водяного знака, можно добиться хорошей устойчивости водяного знака и различимости знаков между собой.

### 2.2. Wavelet-преобразование

Wavelet-преобразование, реализованное алгоритмом, является двумерным аналогом преобразования, описанного в [8, 9]. Двумерный массив  $B$  разме-

ра  $(2^n + 1) \times (2^n + 1)$  представляет исходное изображение, т. е. для всех  $x, y = 0, \dots, 2^n$  величина  $B[x, y] \in \{0, \dots, 255\}$  есть значение яркости пикселя с координатами  $(x, y)$ . (Если изображение полноцветное, то под яркостью пикселя будем понимать яркость одной из цветовых составляющих, например красной.)

На первом шаге работы алгоритма строится массив

$$B_1[x, y] := B[2x, 2y], \quad x, y = 0, \dots, 2^{n-1}.$$

Таким образом, изображение  $B_1$  в четыре раза меньше изображения  $B$ . Оставим массив  $B_1$  до следующего шага, а вместо значений яркости точек изображения, не вошедших в  $B_1$ , будем хранить массивы  $H_1$ ,  $V_1$  и  $C_1$ , описывающие отклонение яркости точки от ожидаемой:

$$H_1[x, y] := B[2x+1, 2y] - \frac{1}{2}(B[2x, 2y] + B[2x+2, 2y]).$$

Иначе говоря,  $H_1[x, y]$  — отклонение яркости точки с координатами  $(2x+1, 2y)$  от среднего арифметического яркостей двух соседних по горизонтали точек  $(2x, 2y)$  и  $(2x+2, 2y)$ . Аналогично

$$V_1[x, y] := B[2x, 2y+1] - \frac{1}{2}(B[2x, 2y] + B[2x, 2y+2])$$

есть отклонение яркости точки с координатами  $(2x, 2y+1)$  от среднего арифметического яркостей двух соседних по вертикали точек и

$$C_1[x, y] := B[2x+1, 2y+1] - \frac{1}{4}(B[2x, 2y] + B[2x+2, 2y] + B[2x, 2y+2] + B[2x+2, 2y+2])$$

есть отклонение яркости точки с координатами  $(2x+1, 2y+1)$  от среднего арифметического яркостей четырех соседних точек.

Следующий шаг — так называемый *лифтинг*. На данном этапе обновляются точки массива  $B_1$ . Это нужно для того, чтобы средняя энергия изображения  $B_1$  (его средняя яркость) была равна средней яркости исходного массива. Для этого полагают

$$B_1[x, y] := B_1[x, y] + \frac{1}{4}(H_1[x, y] + V_1[x, y] + C_1[x, y]).$$

Полученные массивы коэффициентов  $H_1, V_1, C_1$  — массивы первого диапазона — отражают наиболее тонкие детали изображения. Исходное изображение однозначно восстанавливается по массиву  $B_1$  и массивам коэффициентов  $H_1, V_1, C_1$ .

Далее с массивом  $B_1$  проделываются те же операции, что и с массивом  $B$  на предыдущем шаге. Получаются массивы коэффициентов второго диапазона  $H_2, V_2, C_2$  и массив  $B_2[x, y]$ . Повторяя этот процесс, на последнем шаге получаем массивы  $H_n, V_n, C_n$  и массив  $B_n$  размера  $2 \times 2$ .

По массиву  $B_n$  и массивам коэффициентов  $\{H_k, V_k, C_k\}, k = 1, \dots, n$ , можно, проделав все шаги в обратной последовательности, восстановить исходное изображение  $B$ .

Нетрудно понять, что любой коэффициент первого диапазона влияет на изображение лишь в квадрате со стороной в 3 пикселя, второго — в квадрате со стороной 5 пикселей,  $\dots$ ,  $n$ -го — в квадрате со стороной  $2^n + 1$ . Таким образом, каждый диапазон соответствует определенному уровню детализации (резкости).

Следует заметить, что все вычисления могут проводиться без привлечения дополнительной памяти для хранения массивов коэффициентов. Соответствующие коэффициенты могут сразу же замещать значения, используемые для их расчета, так как эти значения используются только один раз. Например, вычислив массив  $H_{i+1}[x, y]$ , им можно заменить массив  $B_i[2x + 1, 2y]$ .

### 2.3. Внедрение водяного знака

Первым делом выбирается цветовая составляющая для внедрения водяного знака. Затем с помощью wavelet-преобразования, описанного в п. 2.2, переходим от массива яркостей пикселей  $B$  к массивам коэффициентов  $\{H_k, V_k, C_k\}, k \in 1 \dots n$ .

Для внедрения водяного знака выбирается диапазон  $k$  и один из массивов  $H_k, V_k$  или  $C_k$ . Далее выбранный массив (пусть для определенности это массив  $H_k$ ) заменяется на массив  $H'_k$  такой, что

$$H'_k[x, y] = (1 - \alpha)H_k[x, y] + \alpha W[x, y],$$

где параметр  $\alpha \in (0, 1)$  определяет «заметность» водяного знака, а массив  $W$  имеет тот же размер, что и  $H_k$ , и описывает водяной знак.

Для наглядности в качестве  $W$  берется соответствующий массив коэффициентов  $k$ -го диапазона некоторого другого изображения того же размера. То есть можно сказать, что водяным знаком в данном случае является некоторое независимое изображение.

Проведя обратное wavelet-преобразование по измененным коэффициентам, получаем  $B'$  — помеченное изображение.

### 2.4. Обнаружение водяного знака

В качестве начальных данных для проверки наличия знака необходимо знать диапазон  $k$  и массив в диапазоне, в который внедрялся знак, а также

сам знак  $W$  и  $\alpha$  — его заметность.

Зная исходное изображение, легко проверить, помечено ли наше изображение, просто сравнивая разность коэффициентов и массив  $W$ . Но если оригинал отсутствует, мы можем лишь предположить с некоторой вероятностью, что массив  $H_k$  коэффициентов измененного изображения образован путем добавления массива  $\alpha W$  к разности  $H_k - \alpha W$ .

Каким же образом принимается решение — помечено изображение знаком  $W$  или нет? Будем считать, что изображение, в которое внедряется знак, имеет графический смысл, т. е. некоторым образом упорядочено и не является случайным набором значений яркостей пикселей. Соответственно массив  $H_k$ , предположительно несущий в себе водяной знак и напрямую связанный с изображением, тоже являет собой некоторую упорядоченную структуру.

Если предположить, что  $H_k$  образован путем добавления массива  $\alpha W$  к разности  $H_k - \alpha W$ , то массив  $H_k - \alpha W$  должен быть менее сложным, более упорядоченным. Остается лишь ввести соответствующую меру сложности изображения. В случае одномерного массива в качестве функции сложности вполне подходит вариация функции. Действительно, чем меньше резких перепадов функции, тем меньше ее вариация; для функции, тождественно равной константе, вариация обращается в ноль, тогда как для функции, близкой к случайному шуму, она очень велика.

В качестве аналога вариации для двумерного массива введем функцию

$$V(H_k) = \sum_{x,y=0}^{2^{n-k}-1} (|H_k[x, y] - H_k[x + 1, y]| + |H_k[x, y] - H_k[x, y + 1]|).$$

Итак, на мысль о том, что массив  $H_k$  образован путем добавления массива  $\alpha W$  к разности  $H_k - \alpha W$ , наводит то, что сложность массива  $H_k - \alpha W$  меньше, чем сложность массива  $H_k$ , т. е.

$$V(H_k - \alpha W) < V(H_k).$$

Для более надежной работы алгоритма введем порог  $\beta$  и будем считать, что водяной знак  $W$  обнаружен в массиве  $H_k$  коэффициентов изображения, если

$$V(H_k) - V(H_k - \alpha W) > \beta \alpha V(W),$$

где значение  $\alpha V(W)$  соответствует максимально возможному увеличению вариации при добавлении  $\alpha W$  к массиву  $H_k$ , а  $\beta$  подбирается экспериментально с учетом вероятного искажения изображения.

### 2.5. Результаты работы

Для проверки работы алгоритма была написана программа в Delphi 5. Программа позволяет внедрять водяные знаки в квадратные изображения размера  $(2^n + 1) \times (2^n + 1)$ . Также интерфейсом программы предусмотрено тестирование полученных знаков на устойчивость к сжатию JPEG с разным качеством сжатия и на зашумление изображения различной интенсивности.

Тестирование программы проводилось по следующей схеме:

- 1) загружаются изображение и водяной знак (тоже являющийся изображением, см. п.2.3);
- 2) устанавливаются значения параметров:  $k$  — номер диапазона;  $\alpha$  — заметность в процентах; параметр, определяющий, какой из трех массивов диапазона ( $H_k$ ,  $V_k$  или  $C_k$ ) используется для внедрения водяного знака; а также цветовая составляющая, в которую внедряется знак;
- 3) производится поиск водяного знака в еще не помеченном изображении, так называемая проверка на ложную тревогу;
- 4) внедряется водяной знак;
- 5) производится поиск водяного знака в помеченном изображении;
- 6) изображение подвергается атакам (шум, JPEG);
- 7) производится поиск знака в искаженном после атаки изображении.

В табл. 1–3 приведены результаты испытания алгоритма на десяти случайным образом выбранных изображениях размера  $257 \times 257$ . Параметр «заметность» для всех опытов был равен 25%, качество сжатия JPEG — 50%, амплитуда случайного шума — 25. Измеряемый параметр — степень присутствия водяного знака — вычисляется по формуле

$$\beta = \frac{V(H_k) - V(H'_k)}{\alpha V(W)}.$$

В табл. 2 и 3, соответствующих  $k = 5$ , не приведены значения  $\beta$  после зашумления, поскольку они фактически совпадают с соответствующими значениями до зашумления. Вместо этого приведен в текстовом виде вывод о наличии знака после действия JPEG. Решение о наличии знака принималось по следующему правилу:

$\beta < 0$	— вывод «нет»
$0 < \beta < 0,1$	— вывод «неизвестно»
$0,1 < \beta < 0,2$	— вывод «наверно»
$\beta > 0,2$	— вывод «да»



В ходе тестирования были выявлены следующие закономерности.

- Ложного обнаружения водяного знака для  $k \in \{4, 5\}$  не происходило.
- Алгоритм показал хорошую устойчивость по отношению к зашумлению изображения для  $k \geq 3$ .
- Наиболее устойчивы по отношению к сжатию JPEG водяные знаки, внедряемые в диапазон с номером  $k \geq 5$ . Для  $k = 4$  после сжатия JPEG знак, как правило, стирается. Чтобы избежать этого, требуется большая заметность знака (40–50%). При  $k = 5$ , как правило, знак выдерживает сжатие JPEG с качеством 50%.
- Оптимальное значение заметности водяного знака примерно 25%. При таком значении изменения изображения практически незаметны глазу и в то же время знаки оказываются достаточно устойчивыми.
- Для большинства изображений не важен выбор цветовой составляющей. Также не выявлено существенной зависимости устойчивости водяного знака от используемого массива данного диапазона.
- Одной из наиболее подходящих схем показало себя сочетание: заметность — 25%,  $k = 5$ .

Таблица 1

Значения степени присутствия  $\beta$  при  $k = 4$ ,  
знак внедрен в массив  $H_4$

№ п/п	Изображение не помечено	Изображение помечено	После JPEG	После зашумления
1	−0,20	0,172	−0,01	0,10
2	−0,40	0,42	−0,07	0,15
3	−0,60	0,07	−0,06	0,37
4	−0,32	0,34	−0,07	0,19
5	−0,33	0,29	−0,01	0,22
6	−0,21	0,42	0,1	0,36
7	−0,55	0,56	−0,01	0,14
8	−0,37	0,45	0,02	0,11
9	−0,38	0,38	−0,01	0,14
10	−0,22	0,23	0,02	0,13

Таблица 2

Значения степени присутствия  $\beta$  при  $k = 5$ ,  
знак внедрен в массив  $H_5$

№ п/п	Изображение не помечено	Изображение помечено	После JPEG	Вывод (найден ли знак)
1	-0,03	0,36	0,33	Да
2	-0,59	0,2	-0,01	Нет
3	-0,66	0,59	0,22	Да
4	-0,33	0,27	0,09	Неизвестно
5	-0,37	0,09	0,02	Неизвестно
6	-0,49	0,04	0,1	Нет
7	-0,37	0,49	-0,28	Да
8	-0,41	0,49	0,22	Да
9	-0,26	0,27	0,14	Наверно
10	-0,29	0,02	-0,04	Нет

Таблица 3

Значения степени присутствия  $\beta$  при  $k = 5$ ,  
знак внедрен в массив  $C_5$

№ п/п	Изображение не помечено	Изображение помечено	После JPEG	Вывод (найден ли знак)
1	-0,24	0,15	0,08	Неизвестно
2	-0,47	0,22	0,1	Наверно
3	-0,69	0,67	0,33	Да
4	-0,42	0,12	0,00	Неизвестно
5	-0,30	0,17	0,09	Неизвестно
6	-0,32	0,25	0,2	Да
7	-0,51	0,27	0,16	Наверно
8	-0,31	0,33	0,22	Да
9	-0,16	0,26	0,15	Наверно
10	-0,04	0,12	-0,16	Нет

### 3. Заключение

В работе был разработан и исследован алгоритм внедрения цифровых водяных знаков в изображение, основанный на дискретном wavelet-преобра-

зовании. Алгоритм позволяет внедрять водяные знаки, устойчивые по отношению к некоторым искажениям изображения, таким, как сжатие JPEG и зашумление. Направлением дальнейшей работы может быть улучшение алгоритма для получения знаков, устойчивых к вырезанию фрагментов изображения. Устойчивость и незаметность знаков, внедряемых алгоритмом, может быть также повышена за счет более эффективного использования особенностей визуального восприятия изображения человеческим глазом, так как в существующей версии алгоритма этот фактор учитывается лишь на примитивном уровне.

### Литература

1. YEUNG M. M. (ED.) Digital watermarking // Communications of the ACM. 1998. Vol. 41, №7.
2. MEMON N., WONG P. W. Protecting digital media content // Ibid. P. 35–43.
3. LACY J., QUACKENBUSH S. R., REIBMAN A. ET AL. Intellectual property protection systems and digital watermarking // Optics Express. 1998. Vol. 3, №12. P. 478–484.
4. BORS A. G., PITAS I. Image watermarking using block site selection and DCT domain constraints // Ibid. P. 512–523.
5. SU P.-C., WANG H.-J. M., KUO C.-C. J. An integrated approach to image watermarking and JPEG-2000 compression // J. VLSI Signal Process. Syst. Signal Image Video Technol. 2001. Vol. 27, №1–2. P. 35–53.
6. WANG H.-J. M., SU P.-C., KUO C.-C. J. Wavelet-based digital image watermarking // Optics Express. 1998. Vol. 3, №12. P. 491–496.
7. XIA X. G., BONCELET C. G., ARCE G. R. Wavelet transform based watermark for digital images // Ibid. P. 497–511.
8. SWELDEN W. Wavelets and the lifting scheme: a 5 minute tour // Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 1996. Vol. 76 (Suppl.2). P. 41–44.
9. SWELDEN W., SCHRODER P. Building your own wavelets at home // Wavelets in Computer Graphics. ACM SIGGRAPH Course Notes. 1996. P. 15–87.

*Статья поступила 13.11.2001 г.*